对流云动力学研究的进展

巢紀平

（中国科学院地球物理研究所）

在我国，对流云的活动是极频繁的。研究对流云的发生、发展条件和結构，对国民經济有着重要的意义。一方面，很多災害性天气如雷暴、冰雹和暴雨等，都与对流云的猛烈发展有关。研究对流云发展和活动的規律，将直接有助于提高这种小范围災害性天气預报的准确率。另一方面，对流云是人工降水作业的对象。虽然目前人工降水的催化方法，一般只是从影响云滴增长的微观过程入手，但由于云滴增长的微观过程很受云的宏观条件的制約，因此，研究对流云发展的宏观条件和特征，同研究云滴增长的微观过程一样，对进一步提高人工降水和人工消雹的效果，都是重要的环节。由于对流云的研究涉及到很多方面，本文只对动力学方面的研究成果作些介紹。

目前观测事实已經为动力学的研究提出了不少問題。从預报和人工降水的角度来看，我們認为有两个問題是更为重要的。这两个問題是：（1）在什么局地条件下，对流云能够发生、发展？（2）对流云的生命史具有那些特征以及那些因子制約了它的強度和結构？

这方面的理論研究实际上开始得很早，例如很早就有用絕热气流法以及到 30 年代提出用薄层法来研究对流云的发展条件。然而，实践表明，用这种簡单的理論来預計对流云的发生、发展，常常并不是有效的。事实上，由于控制对流云发生、发展的条件是复杂的，如环境的层結、湿度、盛行风以及下垫面的属性等，在不同情况下都会起重要的影响。因此一个研究对流云发生、发展的理論，决不可能是簡单的单因子理論。

不过，在过去，要作这种多因子影响的定量研究，事实上也是不可能的。因为当时还缺乏一种有效的計算工具。只有当电子計算机問世后，才为这种研究提供了可能性。同时近年来大气环流数值試驗和数值天气預报的成功，也鼓舞了人們尝試去应用数值試驗这种新方法来研究对流云的理論問題。

象数值研究天气变化必須首先建立天气方程組一样，要研究对流云的发生、演变和結构，也必須首先建立对流云动力学方程組。一組能描写对流云生命史中各种过程的方程，是极其复杂的。因为这里不仅有宏观气流的发展問題，同时还有云滴增长的微观过程雷电形成的物理过程等問題。即使不包括雷电过程，这样一組方程至少也有 15 个变量[1]。从方程的性質上看，这里面有描写

宏观气象要素演变的流体力学方程，也有描写云滴增长的属于統計力学的非綫性随机碰併方程。在目前即使应用高速电子計算机，要直接求出这組方程的解也是困难的。不过，作为研究的第一步，可以把宏观过程和微观过程分开来处理。这样，問題就大大簡化了。对于研究宏观过程来說，現在只需建立一組描写对流云发展的宏观方程組。

宏观对流云动力学方程組，实質上是一組考虑了水汽相变后的重力場中的可压縮流体力学方程組。由于对流云本質上是一种自由对流現象，而它的生命期一般不超过二小时，比起一个太阳日来要短很多，因此与一般大尺度运动方程組不同，其中用阿基米德浮力来代換重力，也不考虑因地球自轉而引起的柯利奥来力。还有一个重要的不同点是：由于对流云的垂直尺度一般与水平尺度一样，也有几公里到十几公里，因此不能象大尺度运动那样，可以用压力的靜力平衡关系来代替垂直运动方程。

另一方面，由于空气介質的可压縮性，在这样一組原始形式的方程組中必然包含有声波。比起对流运动来，声波是一种高頻的振蕩，因此，当求这样一組方程的数值解时，需要相当小的时間和空間步长，否則計算誤差容易发展。象处理大尺度运动时要从原始方程中滤掉重力慣性波这种“气象噪音”一样，也必需設法从現在的原始方程組中滤掉成为“噪音”的声波。如何能尽量不歪曲对流运动的本質，又能方便地滤去声波，这是一个具有原則意义的問題。对于綫性方程，这个問題已分别有人解决了[2,3,4]。因此对流云宏观动力学方程組的形式也基本上确定了。

于是研究一开始就提出的两个問題，就归到給定一定的初始、边界和环境条件，求对流云动力学方程組的积分。自然，由于这仍然是一組非常复杂的非綫性偏微分方程，在求解时，根据不同的情况还得作不同的簡化，即拟訂各种所謂“模式”。

在第一个問題方面，梅逊等[5]把对流云看成是与外界有混合过程的浮升气块。应用这一模式他們分析了对流云发生、发展的条件*。如果不考虑云內外空气有混合以及摩擦阻力，那么这个模式就变成經典的絕热气块模式。在这种情况下，計算表明，气块将作強烈的振蕩运动。这种运动的性質和強度都与对流云的实际发展情况不符。这說明为什么过去簡单的絕热气块法常常过分夸大了对流云的发展強度。由此也說明了，由云內外空气混合所造成的“阻力”，对对流云的发展的确是重要的。

当考虑了混合过程并給了一定的数值后，計算表明，制約对流云发生、发展的重要因素，是环境的层結、湿度、初始温度偏差。并且对流云的发生、发展“敏鋭”地依賴于这些参数的数值。例如，当其他参数相同，相对湿度为70% 时，甚至层結取 9℃/公里，云也不能发生。但当相对湿度增大到 80% 时，即使层結取 8℃/公里，也可能有云形成。又如，在一定条件下，层結从 7℃/公里增加到 8℃/公里时，云的強度很少有改变，但当层結从 8℃/公里增加得 9℃/公里时，云厚将从 0.9 公里增大到 4.5 公里，垂直速度的最大值从 2.5 米/秒增大到 12 米/秒，含水量从 0.25 克/仟克增大到 1.9 克/仟克。这种“敏鋭性”更突出地表現在对初始温度偏差 ΔT_0 的数值上。如果当其他参数相同，$\Delta T_0 = 0.5°C$ 时，云尚不能发生，但当 $\Delta T_0 =$

---

* 陈瑞荣最近也作过类似的研究[6]。

=0.6°C 时，云就发展起来了。浅井富雄[7]的一維模式試驗結果也表明，对流云能否发生与参数值很有关系。

从以上的数值試驗結果可以得出一条重要的結論：对于一定的环境条件（层結、湿度等），要激发起对流云，初始扰动的強度必需达到某一临界值。进一步利用更接近实际的模式給出对流云发生、发展的临界条件，这不仅对对流云預报是重要的，而且还具有更积极的意义。因为参照理論分析的結果，在比較合适的情况下，人們可以根据已經出現的环境条件，用人工的办法制造某种初始扰动来激发对流云的发展，为局部降水創造必要的条件。事实上，这种人工造云的試驗也有人在做了。虽然这里面还存在不少需要解决的問題，但不失为是人工控制局部天气的一个探索方向。

关于第二个問題。观測表明，对流云往往是由很多个云泡迭积而成。因此研究者首先注意研究云泡的生命史。从馬尔古斯开始的很多数值試驗都表明[8-10]：初始温度扰动只要經过 3—5 分鈡便能发展成一个成熟的云泡，成熟了的云泡呈蘑菇状，流場的結构宛如涡环。上升的云泡是暖的，四周的干冷空气从泡的底部楔入泡中，使温度梯度在泡的前沿部分增大(图1)。計算也表明，环境空气不稳定度的增大，虽然有利于云泡的发展，但却使云泡的尺度变小。由于目前缺乏云泡生命史特征的詳細观測，这些图案的可靠程度尚有待驗証。但这些計算結果与一些对流泡的实驗結果(如見文献[11])是相近的。

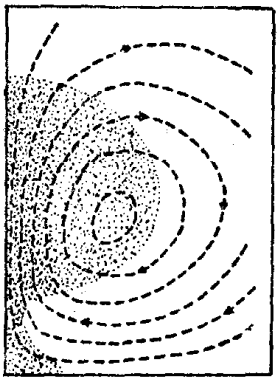
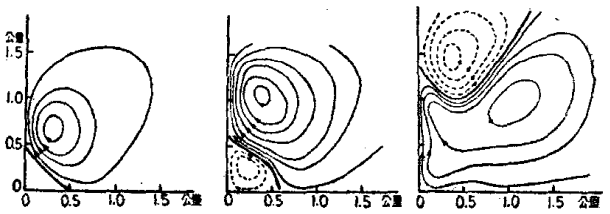


图 1　云泡結构阴影区是暖空气区

在以上的数值計算中，四周一般都采用固定边界，大气除下界地面外，是不存在固定边界的。周晓平[12]采用边界随时間外推的办法，进一步作了云泡发展的数值研究。云泡生命史的特征与上面的結果有所不同（图2）。在发展初期，在云泡主环流的下面还有一个小的、方向与主环流相反的逆环流，以后这个逆环流逐漸消失，而在主环流的頂部，又逐漸发展出一个下沉环流。云頂則出現下沉气流，这已有观測指出过。云底逆环流的出現，虽然尚未被观測所注意，但仔細看一下商德尔[13]的对流实驗，便可以发現这个逆环流是存在的。



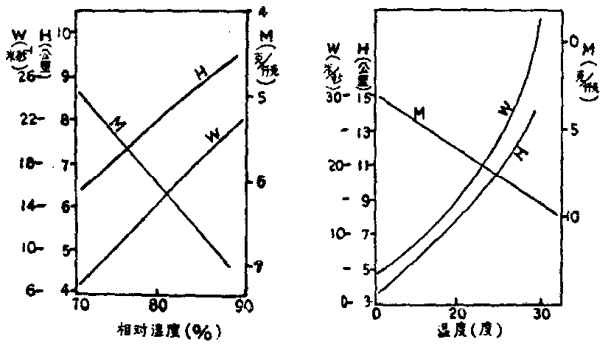
4 分鈡时　　8 分鈡时　　12 分鈡时

图 2　云泡的演变

在上述的数值試驗中，尚未考虑水汽的作用。最近，周晓平等[14]进一步計入了水汽的影响。

另一方面，也有很多关于尺度較大的对流云塔的研究。哈尔挺納[15]遵循斯图墨耳[16]和霍頓等[17]的工作，应用一个考虑了側向混合过程后的一維定常模式，数值地研究了对流云塔发展到中期时的垂直結构。計算所得的垂直速度分布与观測較接近，即呈抛物綫状，最大值发生在云的中上部。含水量的最大值发生在云頂，与观測結果还比較符合。計算并指出，影响对流云強度最重要的参数是环境的相对湿度和大气本身的平均温度。

这两个参数对云厚、最大速度和最大含水量值的影响如图 3 所示。环境的层結对云厚、垂直速度的大小有显著的影响，但对含水量大小的影响却不大。这些結果是合理的，說明了对流云为什么經常在"温高湿重"的天气里会有猛烈的发展。



H——含水量　*M*——云厚　*W*——垂直速度

图 3　对流云的强度与相对湿度和温度的关系

在构成一維模式的連續性方程时，哈尔挺納假定云形是随高度不变的，即把对流云塔看成是圓柱体，但对空气的側向混合率却未加限制。斯快尔司等[18]則相反，他們假定側向混合率正比于当时的垂直速度，而对云形不加限制。在这种情况下計算指出，当云底的質量流大到一定时，对流云的頂部可以出現鉆状結构，即形成积雨云。

在对流云定常态的研究方面，古特曼[19]曾給出过一个更完善的理論。他求出了二維非綫性对流云动力学方程組（不考虑湍流扩散項）在齐次边界条件下的閉合解，并給出一个积雨云形成的例子(图 4)。与斯快尔司等的見解不同，他認为鉆状結构的出現与环境逆温层的存在有直接关系。很有意思，根据古特曼的理論分析，二維非綫性对流云动力学方程組，在齐次边界条件下只有当层結有不稳定层存在时才有非零解，否則只有零界。在不稳定层結下存在非零解，这表明发展成熟了的对流云可以不靠云根而只靠凝結潛热便能維持。由此也可以看出，凝結潛热的确是对流云发展的一个重要能源。

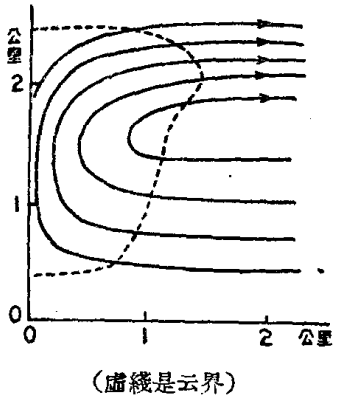


图 4　对流云的結构

为了进一步了解对流云塔的发展过程，巢紀平[20]研究了在地面加热作用下非綫性方程組的非定常解。图 5 給出了一个計算例子。在这个例子中，地面加热強度随时間綫性增加，到 18 分鈡对加热約 2℃；层結在 3 公里以下是不稳定的，以上是稳定的，并在

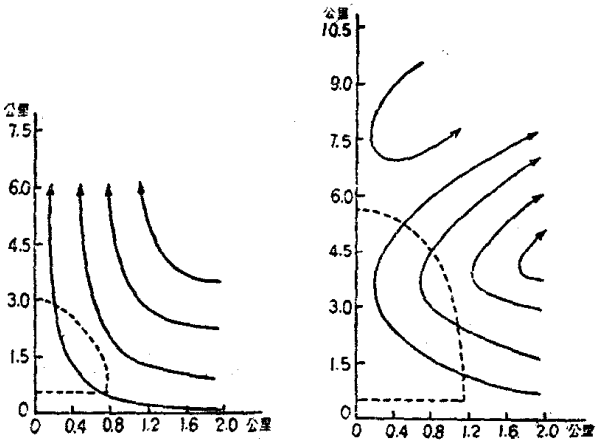


图 5　对流云的演变

5 公里起有逆温层。計算結果表明，对流云发展到一定时間后流場将发生突变，从整层是輻合气流变到在低层是輻合气流而在上层是輻散气流，并在頂部还出現下沉气流。在这个例子中，我們看到，云頂不但能发展到稳定层中，而且还可以穿入逆温层。这表明，只要有足够的能量支持，对流云是可以穿透对流层頂而进入到平流层的。另一方面，另外一例子表明，在一定条件下，对流云的厚度又可以比不稳定层的厚度小很多。由此看

来，精确地預报积云的发展強度是一个很复杂的問題。

胡广兴的計算并指出[21]，在一定条件下云頂的下沉气流可以継續向下延伸，甚至最后可以抑制下部上升气流的发展。

在以上的工作中，只研究了对流云生命史中早期或中期的一些特征，并未給出对流云的整个生命史。在这方面，浅井富雄[7]应用一維的非定常模式給出了一个例子。在他的例子中，在运动开始后 20—30 分鈡，对流云发展到最盛期，这时云厚約 5 公里，最大垂直速度約 20 米/秒，以后云的发展停止，到 50 分鈡后变成微弱的重力振蕩而消失。

* * *

近几年来对流云动力学的研究进展很快，也取得了一定的成績，但离开解决問題差距还很大。在进一步的研究中，有两方面的問題是值得注意的。

（1）拟訂更合理的模式，針对我国各地經常出現的气象条件，通过数值試驗进一步了解对流云发生、发展的临界条件和生命史的特征。在拟訂模式时，应考虑如何逐步加入和微观过程的相互影响，以及和环境之間的相互影响。事实上，初步的分析已經表明，这种相互制約是重要的[22, 23]。通过模式試驗，最后应該建立一个宏观微观結合的、能反映我国对流性降水发展特征的理論。

（2）猛烈发展的对流云是經常和中小系統的活动联系在一起的。目前的理論研究尚局限在对个体云泡和云塔的分析方面，如何把对流云的活动和中小系統的活动結合起来，是值得考虑的。

此外，如观测表明，冰雹經常发生在系統风強并有垂直切变的情况下，看来盛行风的存在并不总是不利云的发展的，究竟在什么条件下，盛行风的存在能促进对流云的发展呢？又如，观测肯定地表明，雷雨云系統的移动与风場有系統的偏离，其原因何在？再如，对流云塔經常是由一些云泡継續发展迭积而成，一簇云泡如何构成了一个对流云塔？等等。这些具体問題也有待澄清。

[1] 顧震潮，气象学报，**32** (1962)，267—284。
[2] 巢紀平，气象学报，**32** (1962)，104—118。
[3] Ogura, Y. & Charney, J. G., Proc, International Symposium on Numerical Weather Predication in Tokyo, Tokyo, Meteor. Soc. Japan, 431—452 (1960).
[4] Ogura, Q. & Phillps, N. A., *J. Atomos. Sci.*, **19** (1962), 173—179.
[5] Mason, B. J. & Emig, R., Q. J. Roy, *Meteor. Soc.*, **87** (1961), 212—22.
[6] 陈瑞荣，气象学报，**32** (1962)，285—300。
[7] Asai, T., Proc. International Symposium on Numerical Weather Predication in Tokyo, Tokyo, Meteor. Soc. Japan, 469—476, 1960.
[8] Malkus, J. S. & Witt, G., The Atmosphere and Sea in Motion, New York, Rockefeller Institute press, 452—439, 1959.
[9] Lilly, D. K., *Tellus*, **14** (1962), 148—172.
[10] Ogura, Y., *J. Atmos. Sci.*, **19** (1962), 492—502.
[11] Scorer, R. S., *J. Fluid Mech.*, **2** (1957), 583—594.
[12] 周晓平，ИАН СССР, Серия Геофиз., 1962, 548—557.
[13] Saunder, P. M., *Tellus*, **14** (1962), 177—194.
[14] 周晓平等，积云发展理論（未刊稿）1963。
[15] Haltiner, G. J., *Tellus*, **11** (1959), 4—15.
[16] Stommel, H., *J. Meteor*, **4** (1947), 91—94.
[17] Houghton, H. G. & Gramer, H. E. *J. Meteor*, **8** (1951), 95—102.
[18] Squires, P. & Turner, T. S., *Tellus*, **4** (1992). 422—474.
[19] Гутман, Л. Н., ДАН СССР, **112** (1957), 1033—1036.
[20] 巢紀平，气象学报，**31** (1961)，191—204。
[21] 胡广兴，气象学报，**32** (1962)，154—163。
[22] 巢紀平，气象学报，**32** (1962)，164—176。
[23] 巢紀平、胡广兴，論雨滴对气流拖带作用的动力影响（未刊稿），1962。